



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 198 14 630 A 1

51 Int. Cl.⁶:
B 25 J 9/02
B 25 J 9/10
B 25 J 17/02
G 01 S 5/02

21 Aktenzeichen: 198 14 630.2
22 Anmeldetag: 26. 3. 98
43 Offenlegungstag: 30. 9. 99

DE 198 14 630 A 1

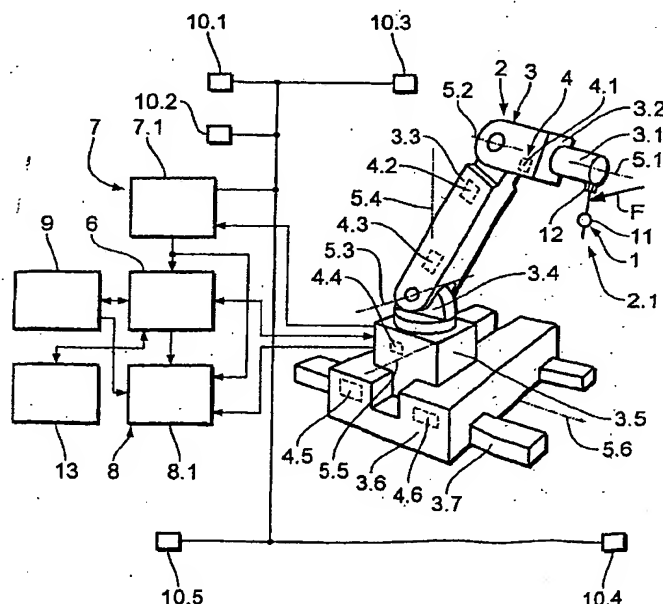
71 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

72 Erfinder:
Müller, Gerhard, Prof. Dr., 14129 Berlin, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren und Vorrichtung zum handgesteuerten Führen eines Werkzeuges in einem vorgegebenen Bewegungsbereich

57 Verfahren zum Führen eines Werkzeuges (1) im Raum, bei dem das am freien Ende (2.1) eines Gelenkarmes (2) mit Antriebseinheiten (4) zueinander verschwenk- und/oder verfahrbaren Armabschnitten (3) angeordnete Werkzeug (1) gesteuert durch die Steuereinrichtung (6) in einem begrenzten Bewegungsbereich verfahren wird, wobei zur Vorgabe des Bewegungsbereiches für die Punkte, die im Bewegungsbereich liegen, jeweils ein Schwenkwinkel und/oder eine Fahrposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) festgelegt wird, die jeweilige Position und Lage des Werkzeuges (1) durch wenigstens eine erste Meßeinrichtung (7) erfaßt wird; zur handgesteuerten Führung des Werkzeuges (1) durch eine zweite Meßeinrichtung (8) eine auf das Werkzeug (1) und/oder den Gelenkarm (2) ausgeübte Betätigungskraft erfaßt wird und die Armabschnitte (3) in Abhängigkeit von der Betätigungskraft, der Position des Werkzeuges (1) und dem vorgegebenen Bewegungsbereich derart zueinander verschwenkt und/oder verfahren werden, daß sich das Werkzeug (1) innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereichs im wesentlichen in Richtung der Betätigungskraft bewegt.



DE 198 14 630 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 15.

In der Meßtechnik, der Materialbearbeitung und insbesondere in der Medizin müssen häufig dreidimensionale Freiformflächen an deformierbaren oder inhomogenen Proben etc. vermessen oder bearbeitet werden. Hierzu bedient man sich in der Regel unterschiedlicher Verfahren zur Führung des Meß- oder Bearbeitungswerkzeuges entlang der jeweiligen zu untersuchenden Raumkurven, Flächen oder Raumbereiche, bei denen das Werkzeug am freien Ende eines Gelenkarmes angeordnet ist und das Werkzeug durch Verschwenken oder Verfahren der einzelnen Armabschnitte zueinander in einem vorgegebenen Bewegungsbereich verfahren wird.

So ist es beispielsweise aus dem Bereich der Mikrochirurgie, insbesondere der Neurochirurgie bekannt, ein an dem freien Ende eines derartigen Gelenkarmes befindliches Instrument entlang einer bestimmten Bahnkurve zu verfahren. Die Bahnkurve wird dabei vor dem Eingriff anhand von Diagnoseergebnissen aus der Kernspin- oder Computertomographie geplant und vorgegeben. Der Chirurg verfährt das Werkzeug während des Eingriffs mittels eines mit der Steuereinrichtung des Gelenkarmantriebes verbundenen Betätigungseinheit, beispielsweise einem Joystick oder dergleichen. Dabei erhält der Chirurg stets eine meist optische Rückmeldung, ob er sich auf dem zuvor vorgegebenen Weg befindet oder nicht.

Die Führung des Werkzeuges entlang der vorgegebenen Bahnkurve erfolgt hierbei also unmittelbar durch den Chirurgen. Dies bringt jedoch zum einen den Nachteil mit sich, daß das Verfahren des Instrumentes während des gesamten Eingriffes eine besonders hohe Konzentration des Chirurgen erfordert bzw. die für den Eingriff erforderliche Zeit erhöht und schon kleine Unachtsamkeiten oder Konzentrationschwächen zu erheblichen Abweichungen von der vorgegebenen Bahnkurve mit möglicherweise gravierenden Auswirkungen führen können. Zum anderen bringt die Steuerung mittels Joystick ein böses des unmittelbaren haptischen Kontaktes des Chirurgen zum Instrument mit sich. Dies führt dazu, daß bei Bewegungen, die sich nicht auf die beiden Hauptbewegungsrichtungen (vor - zurück, links - rechts) des Joysticks beschränken, teilweise komplexe Steuerbewegungsabläufe erforderlich sind, die eine relativ lange Einarbeitungszeit und hohe Konzentration während des Eingriffs erfordern und daher Bedienungsfehler provozieren.

Bei anderen Verfahren, wie sie meist mittels bekannter Industrieroboter durchgeführt werden, wird die vorgegebene Bahnkurve etc. nach einem zuvor programmierten Ablauf abgefahren, ohne daß ein Bediener auf den Ablauf Einfluß nimmt. Hierbei wird das Werkzeug zwar relativ exakt entlang der vorgegebenen Bahnkurve geführt, ein Nachteil besteht jedoch darin, daß Abweichungen in der Geometrie des mit dem Werkzeug zu bearbeitenden oder zu untersuchenden Körpers etc. nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand erfaßt und kompensiert werden können. So eignen sich derartige Verfahren beispielsweise nicht für den Einsatz in der Mikrochirurgie, bei der der Chirurg auf etwaige Komplikationen durch nach der Planung der Bahnkurve auftretende Abweichungen oder Veränderungen im Gewebe reagieren können muß.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung der eingangs genannten Art zur Verfügung zu stellen, das bzw. die die genannten Nachteile nicht oder zumindest in geringerem Maße aufweist und das bzw. die insbesondere eine einfache und mög-

lichst exakte Führung des Werkzeuges in einem vorgegebenen Bewegungsbereich ermöglicht.

Die Aufgabe wird, ausgehend von einem Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie ausgehend von einer Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 15, durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 bzw. 15 angegebenen Merkmale gelöst.

Die Erfindung schließt die technische Lehre ein, daß man eine besonders einfach zu betätigende und dennoch exakte Führung des Werkzeuges erzielt, wenn zur handgesteuerten Führung des Werkzeuges durch eine zweite Meßeinrichtung eine auf das Werkzeug und/oder den Gelenkarm ausgeübte Betätigungskraft erfaßt wird und die Armabschnitte dann gesteuert durch die Steuereinrichtung in Abhängigkeit von den erfaßten Betätigungskraft, der erfaßten Position des Werkzeuges und dem vorgegebenen Bewegungsbereich derart zueinander verschwenkt und/oder verfahren werden, daß sich das Werkzeug innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereichs im wesentlichen in Richtung der Betätigungskraft bewegt.

Durch die Auslösung der Bewegung des Werkzeuges durch die erfaßte Betätigungskraft auf das Werkzeug bzw. den Gelenkarm wird zum einen erreicht, daß der unmittelbare Kontakt zwischen Bediener und Werkzeug hergestellt ist, was diesem die Bedienung auch bei komplexen Bewegungsabläufen deutlich erleichtert, da er keine aufwendigen Steuerbewegungen durchführen muß, sondern auf das Werkzeug bzw. den Gelenkarm lediglich eine Betätigungskraft in der gewünschten Bewegungsrichtung ausüben muß.

Durch die erfindungsgemäße Steuerung der Antriebseinheiten der einzelnen Armabschnitte ist zudem gewährleistet, daß das Werkzeug im vorher festgelegten Bewegungsbereich verfahren wird. Ein unbeabsichtigtes Verlassen des festgelegten Bewegungsbereiches ist zuverlässig ausgeschlossen, so daß sich der Bediener weniger auf die Führung des Werkzeuges im vorgegebenen Bewegungsbereich konzentrieren muß, sondern beispielsweise seine Konzentration in vorteilhafter Weise anderen Problemen etc. während der Führung des Werkzeuges widmen kann. Gerade in der Neurochirurgie ist diese wie eine Schablone wirkende Führung des Werkzeuges von großem Vorteil, da der Chirurg sein Augenmerk dann mehr auf das umliegende Gewebe richten kann und sich nicht ständig mit Kurskorrekturen beschäftigen muß.

Vorzugsweise können mehrere Bewegungsbereiche festgelegt werden, zwischen denen der Bediener auswählen kann. Vorzugsweise kann diese Auswahl auch während der Führung des Werkzeuges erfolgen und alternativ oder zusätzlich können auch noch während einer bereits begonnenen Führung des Werkzeuges weitere neue Bewegungsbereiche festgelegt und ausgewählt werden.

Weiterhin versteht es sich, daß bei bevorzugten Varianten der Erfindung die Verfahrensgeschwindigkeit des Werkzeuges verstellbar ist. Vorzugsweise kann die Verfahrensgeschwindigkeit des Werkzeuges durch den Bediener auch während der Durchführung des Verfahrens verstellt werden, um diesem ein der jeweiligen Situation angepaßtes Navigieren zu ermöglichen. So können beispielsweise bei einem chirurgischen Eingriff unkritische Passagen schnell durchfahren werden, während in kritischen Passagen eine vorsichtige und langsame Fortbewegung möglich ist.

Vorzugsweise werden zur Steuerung der Antriebseinheiten die Ist-Position des Werkzeuges und die Richtung der Betätigungskraft kontinuierlich oder intermittierend ermittelt und für die ermittelte Ist-Position des Werkzeuges aus den benachbarten ersten Punkten derjenige ermittelt, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft auf-

weist. Anschließend werden die Armabschnitte durch die Antriebseinheiten in die diesem ermittelten ersten Punkt entsprechende Winkelstellung verschwenkt bzw. in die entsprechende Verfahrsstellung verfahren. Weiter vorzugsweise erfolgt die Ermittlung der Ist-Position des Werkzeuges und die Richtung der Betätigungskraft nach jedem Verschwenken bzw. Verfahren der Armabschnitte in die dem ausgewählten ersten Punkt entsprechende Position, da sich hiermit eine besonders einfach aufgebaute Steuerung erzielen läßt.

Die maximale Feinheit der Auflösung des Bewegungsbereiches in erste Punkte hängt von den Bewegungsinkrementen der Antriebseinheiten ab. Je geringer bei rotatorischen Antrieben das Winkelinkrement bzw. bei Linearantrieben das Längsinkrement ist, desto feiner ist die erzielbare Auflösung des Bewegungsbereiches und umso besser ist damit auch die Annäherung der Bewegung des Werkzeuges an eine beliebig gekrümmte Bewegungsbahn.

Bei dem Bewegungsbereich handelt es sich vorzugsweise um wenigstens eine Raumkurve, wenigstens eine Freiformfläche oder wenigstens einen begrenzten Raumbereich oder auch um eine Kombination aus diesen. Bei bevorzugten Ausführungen der Erfindung wird zudem innerhalb des Bewegungsbereiches ein erster Unterbereich festgelegt. Das Anfahren von ersten Punkten innerhalb des ersten Unterbereiches wird dann durch wenigstens ein erstes akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht. Zusätzlich oder alternativ wird das Anfahren von ersten Punkten außerhalb des ersten Unterbereiches durch wenigstens ein zweites akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht. Hierdurch ist es in einfacher Weise möglich, einen Toleranzbereich um einen vorgegebenen idealen Bewegungsbereich zu definieren, innerhalb dessen das Werkzeug bewegt werden kann. Der Bediener erhält dann durch das jeweilige akustische bzw. optische Signal einen Anhaltspunkt, ob er sich im Toleranzbereich befindet oder nicht.

Es ist beispielsweise möglich den ersten Unterbereich als eine Freiformfläche festzulegen, die den idealen Bewegungsbereich darstellt, und den Toleranzbereich durch einen Bewegungsbereich festzulegen, der sich zu beiden Seiten der Freiformfläche bis zu einem gewissen senkrechten Abstand zur Freiformfläche hin erstreckt. Bei anderen Varianten kann es sich bei dem ersten Unterbereich aber auch um einen Raumbereich oder eine Raumkurve bzw. eine Kombination aus den genannten Möglichkeiten handeln. Auch hier ist es wiederum möglich, daß mehrere Unterbereiche festgelegt werden, zwischen denen der Bediener auswählen kann. Vorzugsweise kann diese Auswahl wiederum während der Führung des Werkzeuges erfolgen und alternativ oder zusätzlich können auch noch während einer bereits begonnenen Führung des Werkzeuges weitere neue Unterbereiche festgelegt und ausgewählt werden.

Bei bevorzugten Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für die Größe der ermittelten Betätigungskraft eine erste Schwelle vorgegeben, bei deren Überschreitung das Verschwenken der Armabschnitte erfolgt. Hierdurch ist eine exakte Führung und Positionierung des Werkzeuges möglich, da ein unbeabsichtigtes Bewegen des Werkzeuges durch eine geringe Betätigungskraft, beispielsweise bei Belassen der Führungshand am Werkzeug oder Gelenkarm, zuverlässig vermieden werden kann. Alternativ, vorzugsweise aber zusätzlich wird eine zweite Schwelle vorgegeben, bei deren Überschreitung das Verschwenken bzw. Verfahren der Armabschnitte beendet wird und die Armabschnitte in ihrer jeweiligen Schwenkposition und/oder Verfahrsposition festgesetzt werden. Hierdurch wird vermieden, daß sich das Werkzeug infolge einer geringen Betätigungskraft noch unbeabsichtigt weiterbewegt.

Sofern die Antriebseinheiten nicht selbsthemmend ausgebildet sind oder ihre Selbsthemmung nicht ausreicht, um die Armabschnitte in ihrer jeweiligen Schwenkposition und/oder Verfahrsposition festzusetzen, können entsprechende Einrichtungen wie Bremsen oder dergleichen vorgesehen sein, die bei Unterschreiten der zweiten Schwelle aktiviert werden, um die Armabschnitte in ihrer Position festzusetzen, und die bei Überschreiten der ersten Schwelle wieder gelöst werden. Zufällige schwerkraftinduzierte Bewegungen des Gelenkarmes und damit des Werkzeuges sind hierdurch zuverlässig ausgeschlossen.

Bei besonders günstigen Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für die zweiten Punkte, die in dem durch das auf dem Gelenkarm befindliche Werkzeug erreichbaren Raum liegen, jeweils ein Schwenkwinkel und/oder eine Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten des Werkzeuges festgelegt. Weiterhin wird für die Größe der ermittelten Betätigungskraft eine dritte Schwelle vorgegeben, bei deren Überschreitung das Verschwenken und/oder Verfahren der Armabschnitte derart erfolgt, daß sich das Werkzeug im wesentlichen in Richtung des zur erfaßten Ist-Position benachbarten zweiten Punktes bewegt, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft aufweist. Bei Überschreiten der dritten Schwelle ist es also möglich, den vorgegebenen Bewegungsbereich zu verlassen. Hierdurch kann in einfacher Weise auf eventuelle Veränderungen im Bewegungsbereich reagiert werden. Die Zwangsführung im Bewegungsbereich des Werkzeuges ist bei diesen Varianten folglich nicht starr, sondern kann gemäß den jeweiligen Umständen durch einfaches Aufbringen entsprechend großer Betätigungskräfte überwunden werden.

Vorzugsweise wird das Anfahren von zweiten Punkten innerhalb des Bewegungsbereiches durch wenigstens ein drittes akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht, um dem Bediener einen Anhaltspunkt zu geben, daß er sich im vorgegebenen Bewegungsbereich befindet. Zusätzlich oder alternativ wird das Anfahren von zweiten Punkten außerhalb des Bewegungsbereiches durch wenigstens ein viertes akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht. Der Bediener erkennt dann unmittelbar, daß er den vorgegebenen Bewegungsbereich verlassen hat. Ein unbeabsichtigtes Verlassen des vorgegebenen Bewegungsbereiches wird somit sofort erkannt.

Die Steuereinrichtung kann bei diesen Varianten so ausgebildet sein, daß das Werkzeug wieder in Richtung des vorgegebenen Bewegungsbereiches verfahren wird, sobald die dritte Schwelle wieder unterschritten wird, um wieder in den vorgegebenen Bewegungsbereich zurückzukehren. Vorzugsweise ist sie aber so ausgebildet, daß die Navigation außerhalb des Bewegungsbereiches auch mit Betätigungskräften unterhalb der dritten Schwelle möglich ist und die Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich erst wieder einsetzt, wenn das Werkzeug durch den Bediener erneut in den in den vorgegebenen Bewegungsbereich verfahren wurde. Hierbei kann es vorgesehen sein, daß der Bediener einen Hinweis erhält, wie er auf kürzestem Wege wieder zurück in den vorgegebenen Bewegungsbereich gelangt.

Es versteht sich, daß bei günstigen Varianten der Erfindung auch für das Verlassen des ersten Unterbereiches und die Bewegung im Toleranzbereich eine in analoger Weise wirkende Schwelle für die Betätigungskraft vorgesehen sein kann.

Bei bevorzugten Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges der Schwenkwinkel und die Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten erfaßt, woraus sich in

einfacher Weise mit der bekannten Geometrie der Armabschnitte und des Werkzeuges die Position und Lage des Werkzeuges bestimmen läßt. Vorzugsweise erfolgt die Erfassung des Schwenkwinkels und der Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten bei besonders einfach gestalteten Varianten durch wenigstens einen im Anschlußbereich zwischen den jeweiligen Armabschnitten angeordneten Lagegeber, beispielsweise durch wenigstens einen im Bereich des jeweiligen Gelenkes angeordneten Winkelgeber. Es versteht sich jedoch, daß auch andere bekannte Meßmethoden zur Positionsbestimmung der einzelnen Armabschnitte eingesetzt werden können.

Besonders vorteilhafte Ausführungen des erfindungsgemäßen Verfahrens zeichnen sich dadurch aus, daß die Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges nach Art einer Koppelnavigation erfolgt. Dies geschieht über die Bestimmung der Position eines ersten Anschlusses zwischen zwei Armabschnitten im Raum durch wenigstens drei raumfeste voneinander beabstandete Hochfrequenzsender und wenigstens einen im Bereich des ersten Anschlusses zwischen zwei Armabschnitten des Gelenkarmes angeordneten Empfänger sowie die Erfassung der Schwenkwinkel und der Verfahrsposition der Armabschnitte zwischen dem ersten Anschluß und dem Werkzeug. Die Bestimmung der Position eines Punktes mittels mehrerer raumfest voneinander beabstandeter Hochfrequenzsender und eines im zu bestimmenden Punkt angeordneten Empfängers ist wohl bekannt. Die Position des Werkzeuges kann dann wieder anhand der Position des ersten Anschlusses und der Schwenkwinkel bzw. der Verfahrsposition der Armabschnitte zwischen dem ersten Anschluß und dem Werkzeug mit der bekannten Geometrie der Armabschnitte und des Werkzeuges bestimmt werden.

Hierdurch wird der Fehler reduziert, der sich bei den oben genannten Varianten anhand der Fehler der Lagegeber ergibt. So pflanzt sich beispielsweise der Winkelfehler von im Bereich der Gelenke angeordneten Winkelgebern zum freien Ende des Gelenkarmes hin exponentiell fort, weshalb der Gelenkarm bei diesen Varianten relativ steif und aufwendig auszuführen ist, um diesen Fehler gering zu halten. Bei der genannten Kopplung zwischen der Positionsbestimmung des am Gelenkarm angeordneten Empfängers und der Erfassung der Schwenkwinkel bzw. der Verfahrsposition der Armabschnitte zwischen dem ersten Anschluß und dem Werkzeug reduziert sich dieser Fehler, da der Fehler der Lagegeber von der Verankerung des Gelenkarmes bis zum ersten Anschluß nicht mit in die Berechnung der Werkzeugposition eingeht. Der Gelenkarm kann daher weniger aufwendig ausgeführt werden, ohne die Präzision der Positionsbestimmung des Werkzeuges zu beeinträchtigen. Bei weiteren vorteilhaften Varianten wird dieser sich aus den Fehlern der Lagegeber ergebende Fehler vollends ausgemerzt, indem die Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges im Raum über wenigstens drei raumfeste, voneinander beabstandete Hochfrequenzsender und wenigstens einen am Werkzeug angeordneten Empfänger erfolgt. Der Gelenkarm kann hierbei dann besonders einfach und leicht ausgebildet sein, da Einflüsse durch Fehler der Lagegeber und Deformationen des Gelenkarmes aufgrund seines Eigengewichtes nicht in die Positionsbestimmung einfließen.

Es versteht sich, daß bei allen diesen Varianten eine Kalibrierung zu erfolgen hat, um sicherzustellen, daß die Positionsbestimmung eines Punktes und die für den Punkt festgelegten Schwenkwinkel und Verfahrspositionen der Armabschnitte miteinander übereinstimmen.

Vorzugsweise werden bei den genannten Varianten der Positionsbestimmung mittels Hochfrequenzsendern fünf Hochfrequenzsender, die mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen senden, und ein zur Erfassung der Phasen-

lage der Hochfrequenzsender ausgebildeter Empfänger verwendet. Aus der unterschiedlichen Phasenlage der Modulationsfrequenzen der einzelnen Hochfrequenzsender, die durch den Empfänger erfaßt wird, kann dann aus der bekannten, raumfesten Positionen der Hochfrequenzsender die Position des Empfängers exakt bestimmt werden. Weiter vorzugsweise werden als Hochfrequenzsender Laserdioden mit Modulationsfrequenzen zwischen 1 MHz und 10 GHz verwendet, wobei sich die Höhe der Modulationsfrequenzen je nach Aufgabenstellung und erforderlicher Meßgenauigkeit richtet.

Die Erfassung der Betätigungskraft kann in vielfacher bekannter Weise durch am Gelenkarm angeordnete Kraftmeßdosen, Drehmomentsensoren etc. erfolgen. Wichtig ist dabei lediglich, daß die infolge der Betätigungskraft auf den Gelenkarm wirkenden Kraftgrößen, d. h. Kräfte und Kräftepaare (Drehmomente), in drei orthogonalen Raumrichtungen vollständig erfaßt werden. Vorzugsweise geschieht dies dadurch, daß zur Erfassung der Betätigungskraft im Bereich der Anschlüsse zwischen den Armabschnitten angeordnete Kraft- und/oder Drehmomentsensoren vorgesehen sind.

Die zugrundeliegende Aufgabe wird weiterhin durch eine gattungsgemäße Vorrichtung gelöst, die zur handgesteuerten Führung des Werkzeuges eine mit der Steuereinrichtung verbundene zweite Meßeinrichtung zur Erfassung einer auf das Werkzeug und/oder den Gelenkarm ausgeübten Betätigungskraft umfaßt und bei der die Steuereinrichtung derart ausgebildet ist, daß das Werkzeug über die Antriebseinheiten in Abhängigkeit von den erfaßten Betätigungskraft und der erfaßten Position des Werkzeuges innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereichs im wesentlichen in Richtung der Betätigungskraft verfahren wird. Die Steuereinrichtung ist dabei vorzugsweise derart ausgebildet, daß für die ermittelte Ist-Position des Werkzeuges aus den benachbarten Punkten im Bewegungsbereich derjenige ermittelt wird, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft aufweist, und die Armabschnitte durch die Antriebseinheiten in die diesem ersten Punkt entsprechende Winkelstellung verschwenkt und/oder die entsprechende Verfahrsstellung verfahren werden. Hierdurch wird das oben geschilderte Verfahren mit all seinen Vorteilen in einer entsprechenden Vorrichtung umgesetzt.

Die Steuereinrichtung umfaßt dabei vorzugsweise eine Verarbeitungseinheit, eine mit dem Steuereingang der Verarbeitungseinheit verbundene erste Vergleichereinheit, einen damit verbundenen zweiten Speicher und alternativ, vorzugsweise aber zusätzlich einen mit der Vergleichereinheit verbundenen dritten Speicher. Dabei ist die erste Vergleichereinheit mit der zweiten Meßeinrichtung verbunden. Der zweite Speicher enthält eine erste Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft. Wird diese erste Schwelle überschritten, so löst die erste Vergleichereinheit die Betätigung der Antriebseinheiten durch die Verarbeitungseinheit aus. Der dritte Speicher enthält demgegenüber eine zweite Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft. Wird diese zweite Schwelle unterschritten, so beendet die Verarbeitungseinheit gesteuert durch die erste Vergleichereinheit die Betätigung der Antriebseinheiten. Die erste und zweite Schwelleninformation können dabei beispielsweise über eine entsprechende Eingabeinrichtung oder aber auch durch Austausch entsprechender Speichermodule von dem Bediener vorgegeben werden. Wie schon oben geschildert, ist durch die Vorgabe dieser Schwellenwerte für die Betätigungskraft in einfacher Weise eine exakte Führung und Positionierung des Werkzeuges möglich.

Sofern die einzelnen Antriebseinheiten keine Selbsthemmung aufweisen oder diese nicht ausreicht, um den Gelenk-

arm in seiner jeweiligen Position zu fixieren, sind bei vorteilhaften Varianten der erfindungsgemäßen Vorrichtung Einrichtungen zum gegenseitigen Festsetzen der Armabschnitte bei Unterschreiten der zweiten Schwelle der Betätigungskraft vorgesehen. Hierzu können beispielsweise einfache Bremsen oder dergleichen eingesetzt werden.

Zur oben bereits ausführlich dargelegten Festlegung eines Toleranzbereiches innerhalb des Bewegungsbereiches ist bei vorteilhaften Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung vorgesehen, daß die Steuereinrichtung eine mit der ersten Meßeinrichtung verbundene zweite Vergleichereinheit umfaßt und der erste Speicher einen ersten Teilbereich, in dem die ersten Informationen enthalten sind, und einen mit der zweiten Vergleichereinheit verbundenen zweiten Teilbereich umfaßt, der eine zweite Information enthält, durch die innerhalb des Bewegungsbereiches ein erster Unterbereich festgelegt ist. Weiterhin ist eine erste akustische und/oder optische Signaleinrichtung vorgesehen, die zur Abgabe wenigstens eines ersten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von Punkten innerhalb des ersten Unterbereiches und/oder zur Abgabe wenigstens eines zweiten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von ersten Punkten außerhalb des ersten Unterbereiches mit der zweiten Vergleichereinheit verbunden ist. Hierdurch ist in einfacher Weise sichergestellt, daß der Bediener der Vorrichtung unmittelbar erkennt, ob er sich im ersten Unterbereich befindet oder nicht.

Um das oben geschilderte Verlassen der Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich zu realisieren, umfaßt der erste Speicher bei bevorzugten Varianten der erfindungsgemäßen Vorrichtung einen ersten Teilbereich, in dem die ersten Informationen gespeichert sind, und einen dritten Teilbereich, der für die Punkte, die in dem durch das am Gelenkarm befindliche Werkzeug erreichbaren Raum liegen, jeweils eine dritte Information über den Schwenkwinkel und/oder die Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten enthält. Die Steuereinrichtung umfaßt dabei weiterhin eine Verarbeitungseinheit, einen ersten Umschalter, eine mit dem ersten Schalteingang des ersten Umschalters verbundene dritte Vergleichereinheit und einen mit der dritten Vergleichereinheit verbundenen vierten Speicher. Dieser vierte Speicher enthält eine dritte Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft. Der erste Teilbereich ist hierbei mit dem ersten Eingang des ersten Umschalters, der dritte Teilbereich mit dem zweiten Eingang des ersten Umschalters, der Ausgang des ersten Umschalters mit der Verarbeitungseinheit sowie die dritte Vergleichereinheit mit der zweiten Meßeinrichtung verbunden. Bei Überschreiten der Schwelle der dritten Schwelleninformation der Betätigungskraft ist dann der dritte Teilbereich des ersten Speichers gesteuert durch die dritte Vergleichereinheit über den ersten Umschalter mit der Verarbeitungseinheit verbunden, so daß die Verarbeitungseinheit die in dem dritten Teilbereich abgelegten dritten Informationen für die Steuerung der Antriebseinheiten verwendet und somit auch Punkte außerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches angefahren werden können.

Vorzugsweise ist auch hier eine optische und/oder akustische Anzeige vorgesehen, die den Bediener darüber informiert, ob er sich innerhalb oder außerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches befindet. Hierzu umfaßt die Steuereinrichtung eine mit der ersten Meßeinrichtung und dem ersten Speicher verbundene vierte Vergleichereinheit und es ist eine zweite akustische und/oder optische Signaleinrichtung vorgesehen. Diese ist zur Abgabe wenigstens eines dritten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von Punkten innerhalb des Bewegungsbereiches und/oder zur Abgabe wenigstens eines vierten akustischen und/oder opti-

schen Signals bei Anfahren von Punkten außerhalb des Bewegungsbereiches mit der vierten Vergleichereinheit verbunden.

Bei besonders günstigen Varianten der erfindungsgemäßen Vorrichtung umfaßt die Steuereinrichtung eine mit der ersten Meßeinrichtung und dem ersten Teilbereich des ersten Speichers verbundene fünfte Vergleichereinheit sowie eine UND-Schaltung, deren Ausgang mit dem zweiten Schalteingang des ersten Umschalters verbunden ist. Die UND-Schaltung weist einen ersten Eingang auf, der mit dem Ausgang der fünften Vergleichereinheit verbunden ist, und einen invertierenden zweiten Eingang, der mit dem Ausgang der dritten Vergleichereinheit verbunden ist. Liegt die Betätigungskraft unterhalb der Schwelle der dritten Schwelleninformation und werden gleichzeitig Punkte innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches angefahren, so ist der erste Teilbereich über den ersten Umschalter mit der Verarbeitungseinheit verbunden, wodurch die Verarbeitungseinheit auf die in dem ersten Teilbereich abgelegten ersten Informationen für die Steuerung der Antriebseinheiten zugreift und somit die Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich hergestellt ist. Wurde also der vorgegebene Bewegungsbereich verlassen und wird er nunmehr mit einer entsprechend geringen Betätigungskraft erneut angefahren, so wird die Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich bei Eintritt in den vorgegebenen Bewegungsbereich wiederhergestellt.

Es versteht sich, daß der Inhalt sämtlicher Speicher bei vorteilhaften Varianten der Erfindung beispielsweise über eine entsprechende Eingabeeinrichtung oder aber auch durch Austausch entsprechender Speichermodule von dem Bediener vorgegeben und verändert werden kann, wobei dies vorzugsweise auch während des Betriebs der Vorrichtung erfolgen kann.

Hinsichtlich der Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges sowie der Erfassung der Betätigungskraft vorteilhafte Varianten der erfindungsgemäßen Vorrichtung, welche die entsprechenden Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens umsetzen, wurden oben zu den entsprechenden Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens bereits ausführlich beschrieben.

Andere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet bzw. werden nachstehend zusammen mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführung der Erfindung anhand der Figuren näher dargestellt. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Vorrichtung,

Fig. 2 das Blockschaltbild der Ausführung aus Fig. 1.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer bevorzugten Variante der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit der das erfindungsgemäße Verfahren durchgeführt werden kann.

Bei dieser Variante ist ein Werkzeug 1 am freien Ende 2.1 eines Gelenkarmes 2 angeordnet. Die Armabschnitte 3 des Gelenkarmes 2 sind über Antriebseinheiten 4 zueinander verschwenkbar bzw. zueinander verfahrbar. Der erste Armabschnitt 3.1 und der zweite Armabschnitt 3.2 werden dabei durch die erste Antriebseinheit 4.1 um die Schwenkachse 5.1 zueinander verschwenkt. Der zweite Armabschnitt 3.2 und der dritte Armabschnitt 3.3 werden durch die zweite Antriebseinheit 4.2 um die zweite Schwenkachse 5.2 zueinander verschwenkt. Der dritte Armabschnitt 3.3 und der vierte Armabschnitt 3.4 werden durch die dritte Antriebseinheit 4.3 um die dritte Schwenkachse 5.3 zueinander verschwenkt. Der vierte Armabschnitt 3.4 und der fünfte Armabschnitt 3.5 werden durch die vierte Antriebseinheit 4.4 um die vierte Schwenkachse 5.4 zueinander verschwenkt. Der fünfte Armabschnitt 3.5 und der sechste Armabschnitt 3.6

werden zueinander durch die fünfte Antriebseinheit 4.5 entlang der fünften Achse 5.5 verfahren, ebenso wie der sechste Armabschnitt 3.6 zum fest im Boden verankerten siebten Armabschnitt 3.7 durch die sechste Antriebseinheit 4.6 entlang der sechsten Achse 5.6 verfahren wird. Die Antriebseinheiten 4.1 bis 4.6 sind mit einer Steuereinrichtung 6 verbunden, von der sie die Steuerimpulse zum gegenseitigen Verschwenken bzw. Verfahren der Armabschnitte 3.1 bis 3.6 erhalten.

Die Antriebseinheiten 4.1 bis 4.6 sind jeweils mit einem – in Fig. 1 nicht dargestellten – inkrementalen Lagegeber versehen, über den der Schwenkwinkel bzw. die Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten erfaßt und an die Steuereinrichtung 6 gesandt wird. Diese Information hinsichtlich der Schwenkwinkel respektive der Verfahrsposition der einzelnen Armabschnitte wird bei der Regelung der Antriebseinheiten verwendet, um das Erreichen der Zielposition der jeweiligen Armabschnitte beim Verschwenken bzw. Verfahren zu detektieren. Als Antriebseinheiten werden im gezeigten Beispiel Schrittmotoren verwendet. Die Schrittlänge der verwendeten Motoren bzw. das Inkrement der verwendeten Lagegeber gehen jeweils mit einem bestimmten Verschwenkinkrement oder Verfahrinkrement zwischen den Armabschnitten einher. Aus dem jeweils größeren der beiden Inkremente ergibt sich dabei die maximale Auflösung des Bewegungsbereiches des Werkzeuges in einzelne Anfahrpunkte.

Weiterhin sind eine erste Meßeinrichtung 7, welche die jeweilige Position und Lage des Werkzeuges 1 erfaßt, eine zweite Meßeinrichtung 8, die eine auf das Werkzeug 1 ausgeübte Betätigungskraft F erfaßt, und ein erster Speicher 9 vorgesehen, in dem erste Informationen über die Schwenkwinkel und Verfahrspositionen der Armabschnitte 3.1 bis 3.7 für erste Anfahrpunkte des Werkzeuges 1 in einem vorgegebenen Bewegungsbereich gespeichert sind. Beide Meßeinrichtungen 7 und 8 sowie der erste Speicher 9 sind mit der Steuereinrichtung 6 verbunden.

Die Meßeinrichtung 7 umfaßt im gezeigten Beispiel eine erste Signalverarbeitungseinrichtung 7.1 und fünf damit verbundene, raumfest installierte, voneinander beanstandet angeordnete Hochfrequenzsender, die von mit jeweils unterschiedlichen Modulationsfrequenzen sendenden Laserdioden 10.1 bis 10.5 gebildet sind. Weiterhin umfaßt die Meßeinrichtung 7 einen am Werkzeug 1 angeordneten photoelektrischen Empfänger 11, der zur Erfassung der Phasenlage der Laserdioden 10.1 bis 10.5 ausgebildet ist. In der ersten Signalverarbeitungseinrichtung 7.1 wird aus der unterschiedlichen Phasenlage der Modulationsfrequenzen der einzelnen Laserdioden 10.1 bis 10.5, die durch den Empfänger 11 erfaßt werden, und aus der bekannten, raumfesten Positionen der Laserdioden 10.1 bis 10.5 die Position des Empfängers 11 und damit die Position des Werkzeuges 1 exakt bestimmt.

Es versteht sich, daß bei anderen Ausführungen die Position des Werkzeuges auch auf andere Weise bestimmt werden kann. So ist es beispielsweise möglich, die Information der Lagegeber der Antriebseinheiten zu verwenden, um aus dieser Information und der bekannten Geometrie der Armabschnitte und des Werkzeuges die Lage des Werkzeuges zu bestimmen. Weiterhin ist es z. B. bei Platzmangel oder dergleichen möglich, den Empfänger nicht am Werkzeug sondern beispielsweise am zweiten Armabschnitt anzubringen und dann die Position des Werkzeuges aus der Position des Empfängers und den Informationen der Lagegeber der ersten und zweiten Antriebseinheit sowie der bekannten Geometrie der betreffenden Armabschnitte und des Werkzeuges die Lage des Werkzeuges zu berechnen.

Eine zweite Meßeinrichtung 8 umfaßt im gezeigten Bei-

spiel eine zweite Signalverarbeitungseinrichtung 8.1 und eine damit verbundene, im Anschlußbereich des Werkzeuges 1 an den ersten Armabschnitt 3.1 angeordnete Meßeinheit 12, welche die jeweils in Richtung dreier orthogonaler Achsen auf das Werkzeug 1 wirkenden Kräfte und Momente mißt. In der zweiten Signalverarbeitungseinrichtung 8.1 wird dann aus den Meßwerten der Meßeinheit 12, der in der ersten Signalverarbeitungseinrichtung 7.1 berechneten Lage und Position des Werkzeuges und den im ersten Speicher gehaltenen ersten Informationen hinsichtlich der in dieser Position bestehenden Schwenkwinkel bzw. Verfahrspositionen der Armabschnitte 3.1 bis 3.7 der Betrag und die Richtung der Betätigungskraft F errechnet. Hierzu ist die zweite Signalverarbeitungseinrichtung 8.1 mit der ersten Signalverarbeitungseinrichtung 7.1 und dem ersten Speicher 9 verbunden.

Es versteht sich, daß bei anderen Ausführungen die Betätigungskraft auch auf andere Weise bestimmt werden kann. So ist es beispielsweise möglich, die im Anschlußbereich der Armabschnitte jeweils Kraft und/oder Drehmomentgeber anzubringen, aus deren Meßwerten zusammen mit der bekannten Geometrie der Armabschnitte und des Werkzeuges sowie der Lage der Armabschnitte und des Werkzeuges dann in bekannter Weise die Betätigungskraft bestimmt werden kann.

Weiterhin ist eine mit der Steuereinrichtung 6 verbundene Eingabeeinheit 13 vorgesehen, über die der Inhalt des ersten Speichers 9 oder Parameter der Steuerung verändert werden können.

Die Steuereinrichtung 6, die erste und zweite Signalverarbeitungseinrichtung 7.1 und 8.1, der erste Speicher 9 sowie die Eingabeeinheit 13 können dabei auch von einem herkömmlichen Computer mit entsprechenden Eingabeeinrichtungen wie Tastatur, Maus etc. gebildet sein, bei dem die Signalverarbeitung und die Steuerung dann durch entsprechende Software realisiert ist.

Fig. 2 zeigt ein Blockschaltbild der Ausführung aus Fig. 1. Die Steuereinrichtung 6 umfaßt hierbei eine Verarbeitungseinheit 14, die mit der ersten Meßeinrichtung 7, der zweiten Meßeinrichtung 8, dem ersten Speicher 9 und den Antriebseinheiten 4 verbunden ist.

Der erste Speicher 9 umfaßt einen ersten Teilbereich 9.1, in dem für jeden Punkt, der innerhalb eines vorgegebenen Bewegungsbereiches mit dem Werkzeug 1 angefahren werden kann, erste Informationen hinsichtlich des jeweiligen Schwenkwinkels bzw. der jeweiligen Verfahrsposition zwischen den einzelnen Armabschnitten 3 des Gelenkarmes 2 gespeichert sind. Weiterhin umfaßt der erste Speicher 9 einen zweiten Teilbereich 9.2, in dem zweite Informationen hinsichtlich der Anfahrpunkte eines ersten Unterbereiches des vorgegebenen Bewegungsbereiches des Werkzeuges 1 enthalten sind. Die zweite Information stellt folglich eine Teilmenge der ersten Information dar.

Durch den ersten Unterbereich wird innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches des Werkzeuges 1 ein Soll-Bewegungsbereich festgelegt, während der Rest des vorgegebenen Bewegungsbereiches einen Toleranzbereich für die Bewegung des Werkzeuges darstellt. Bei dem ersten Unterbereich handelt es sich im gezeigten Beispiel um eine räumliche Freiformfläche, auf der das Werkzeug 1 nach Möglichkeit verfahren werden soll, während es sich bei dem vorgegebenen Bewegungsbereich um einen Bewegungsraum handelt, dessen Begrenzung zu beiden Seiten der Freiformfläche des ersten Unterbereiches in konstantem Abstand zur Freiformfläche verläuft.

Der erste Speicher 9 umfaßt weiterhin einen dritten Teilbereich 9.3, in dem für jeden Punkt, der innerhalb der Bewegungsmöglichkeiten des Gelenkarmes 2 mit dem Werkzeug

1 angefahren werden kann, dritte Informationen hinsichtlich des jeweiligen Schwenkwinkels bzw. der jeweiligen Verfahrenposition zwischen den einzelnen Armabschnitten 3 des Gelenkarmes 2 gespeichert sind. Die erste Information stellt folglich eine Teilmenge der dritten Information dar.

Der Inhalt der Teilbereiche 9.1 bis 9.3 des ersten Speichers 9 wurde dabei vor der Inbetriebnahme der Vorrichtung durch entsprechende Eingaben mittels der Eingabeeinheit 13 festgelegt. Es versteht sich, daß hiervor zunächst eine Kalibrierung des Systems erfolgte, um sicherzustellen, daß die bei den vorgegebenen Schwenkwinkeln bzw. Verfahrenpositionen der Armabschnitte auch tatsächlich die entsprechenden Punkte mit dem Werkzeug 1 angefahren werden. Es versteht sich weiterhin, daß bei anderen Ausführungen auch mehrere erste, zweite und dritte Teilbereiche vorgesehen sein können, in denen unterschiedliche Bewegungsbereiche festgelegt sein können und zwischen denen der Bediener der Vorrichtung auch während des Betriebs der Vorrichtung auswählen kann.

Der erste Teilbereich 9.1 ist mit dem ersten Eingang 15.1 eines ersten Umschalters 15 verbunden, während der dritte Teilbereich 9.3 mit dem zweiten Eingang 15.1 des ersten Umschalters 15 verbunden ist. Der Ausgang 15.3 des ersten Umschalters 15 ist mit der Verarbeitungseinheit 14 verbunden.

Während des Betriebs der Vorrichtung sendet die Verarbeitungseinheit 14 Steuerimpulse an die Antriebseinheiten 4. Diese Steuerimpulse hängen dabei von der durch die erste Meßeinrichtung 7 erfaßten Position des Werkzeuges 1, der durch die zweite Meßeinrichtung 8 erfaßten Betätigungskraft F und je nachdem, welcher der beiden Teilbereiche des ersten Speichers 9 über den ersten Umschalter 15 mit der Verarbeitungseinheit 14 verbunden ist, von dem Inhalt des ersten oder dritten Teilbereiches 9.1 oder 9.3 ab. In der Verarbeitungseinheit 14 wird dabei unter Zugriff auf ein in einem mit der Verarbeitungseinheit 14 verbundenen Programmspeicher 16 abgelegtes Programm derjenige Punkt des mit der Verarbeitungseinheit 14 verbundenen Teilbereiches 9.1 oder 9.3 ermittelt, der zu der durch die erste Meßeinrichtung 7 erfaßten derzeitigen Position des Werkzeuges benachbart ist und dessen von der erfaßten derzeitigen Position des Werkzeuges ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der durch die zweite Meßeinrichtung 8 erfaßten Betätigungskraft F aufweist. Die Verarbeitungseinheit 14 sendet dann die diesem ermittelten Punkt entsprechenden Steuerimpulse an die Antriebseinheiten 4, so daß die Armabschnitte durch die Antriebseinheiten 4 in die diesem Punkt entsprechende Winkelstellung verschwenkt bzw. in die entsprechende Verfahrenstellung verfahren werden. Ist dies erfolgt, beginnt der Ablauf von Neuem.

In Fig. 2 ist der erste Teilbereich 9.1 des ersten Speichers 9 mit der Verarbeitungseinheit 14 verbunden, so daß das Werkzeug 1 in diesem Fall folglich nur Punkte anfährt, die entsprechend der Vorgabe im ersten Teilbereich 9.1 innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches liegen.

Um eine exakte und zuverlässige Positionierung des Werkzeuges 1 zu gewährleisten, ist für die Betätigungskraft eine erste Schwelle vorgegeben, welche die Betätigungskraft überschreiten muß, um ein Verfahren des Werkzeuges 1 auszulösen. Weiterhin ist eine zweite Schwelle für die Betätigungskraft vorgegeben, bei deren Unterschreiten das Verfahren des Werkzeuges 1 gestoppt wird.

Die Verarbeitungseinheit umfaßt hierzu eine mit dem Steuereingang 14.1 der Verarbeitungseinheit verbundene erste Vergleichereinheit 17, einen mit dieser verbundenen zweiten Speicher 18 und einen mit der ersten Vergleichereinheit 17 verbundenen dritten Speicher 19. Die erste Vergleichereinheit 17 ist dabei wiederum mit dem Ausgang der

zweiten Meßeinrichtung 8 verbunden. Der zweite Speicher enthält eine der ersten Schwelle entsprechende erste Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft. Wird diese erste Schwelle von der durch die zweite Meßeinrichtung 8 erfaßten Betätigungskraft überschritten, so liegt am Ausgang 17.1 der ersten Vergleichereinheit 17 und damit am Steuereingang 14.1 der Verarbeitungseinheit 14 ein erster Zustand an, der die Erzeugung der Steuersignale und damit die Betätigung der Antriebseinheiten 4 durch die Verarbeitungseinheit 14 auslöst. Der dritte Speicher 19 enthält demgegenüber eine der zweiten Schwelle entsprechende zweite Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft. Wird diese zweite Schwelle unterschritten, so liegt am Ausgang 17.1 der ersten Vergleichereinheit 17 und damit am Steuereingang 14.1 der Verarbeitungseinheit 14 ein zweiter Zustand an, der Erzeugung der Steuersignale und damit die Betätigung der Antriebseinheiten 4 durch die Verarbeitungseinheit 14 beendet.

Die erste und zweite Schwelleninformation können dabei über die Eingabeeinrichtung 13 auch während des Betriebs der Vorrichtung von dem Bediener vorgegeben werden. Die erste Schwelle ist dabei größer als die zweite Schwelle. Es versteht sich aber, daß bei anderen Varianten die erste Schwelle gleich der zweiten Schwelle sein kann und damit dann für diese nur noch ein Speicher vorzusehen ist.

Die einzelnen Antriebseinheiten 4 weisen im gezeigten Beispiel keine ausreichende Selbsthemmung auf, um den Gelenkarm 2 nach Beendigung des Verfahrens des Werkzeuges 1 in seiner jeweiligen Position zu fixieren. Bei der beschriebenen Vorrichtung sind somit – in Fig. 1 nicht dargestellte – Bremsen 20 vorgesehen, welche die Armabschnitte bei Unterschreiten der zweiten Schwelle der Betätigungskraft gesteuert von der Verarbeitungseinheit 14 relativ zueinander festsetzen. Wird die erste Schwelle der Betätigungskraft wieder überschritten, so werden diese Bremsen 20 gesteuert von der Verarbeitungseinheit 14 wieder gelöst.

Weiterhin ist bei der gezeigten Vorrichtung vorgesehen, daß der Bediener von der Vorrichtung durch eine erste Signaleinrichtung 21 ein erstes optisches und akustisches Signal erhält, wenn die durch die erste Meßeinrichtung 7 erfaßte Position des Werkzeuges 1 innerhalb des im zweiten Teilbereich 9.2 des ersten Speichers 9 festgelegten Unterbereiches des Bewegungsbereiches liegt. Hierzu ist eine mit der ersten Meßeinrichtung 7 und dem zweiten Teilbereich 9.2 des ersten Speichers 9 verbundene zweite Vergleichereinheit 22 vorgesehen, deren Ausgang 22.1 mit der Signaleinrichtung 21 verbunden ist.

Bei der gezeigten Vorrichtung ist weiterhin vorgesehen, daß die Zwangsführung in dem durch den Inhalt des ersten Teilbereiches 9.1 vorgegebenen Bewegungsbereich durch aufbringen einer Betätigungskraft, die oberhalb einer dritten Schwelle liegt verlassen werden kann, indem der dritte Teilbereich 9.3 des ersten Speichers 9 über den Umschalter mit der Verarbeitungseinheit 14 verbunden wird. Die Steuereinrichtung umfaßt hierzu einen vierten Speicher 23, der eine der dritten Schwelle entsprechende dritte Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft enthält. Weiterhin ist eine dritte Vergleichereinheit 24 vorgesehen, die mit der zweiten Meßeinrichtung 8 und dem vierten Speicher 23 verbunden ist und deren Ausgang 24.1 mit dem ersten Schalteingang 15.4 des ersten Umschalters 15 verbunden ist. Überschreitet die durch die zweite Meßeinrichtung 8 erfaßte Betätigungskraft die dritte Schwelle, so liegt am Ausgang 24.1 der dritten Vergleichereinheit 24 und damit am ersten Schalteingang 15.4 des ersten Umschalters 15 ein Schaltimpuls an, durch den der erste Umschalter 15 den dritten Teilbereich 9.3 des ersten Speichers 9 mit der Verarbeitungseinheit 14 verbindet, so daß die Verarbeitungseinheit die in dem

dritten Teilbereich abgelegten dritten Informationen für die Steuerung der Antriebseinheiten verwendet und somit auch Punkte außerhalb des im ersten Teilbereich 9.1 vorgegebenen Bewegungsbereiches angefahren werden können.

Es versteht sich, daß auch der Inhalt des vierten Speichers 23 über die Eingabeeinrichtung 13 auch während des Betriebs der Vorrichtung von dem Bediener vorgegeben bzw. verändert werden kann.

Auch hier ist eine optische und akustische Anzeige vorgesehen, die den Bediener darüber informiert, ob er sich innerhalb oder außerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches befindet. Hierzu ist eine mit der ersten Meßeinrichtung 7 und dem ersten Teilbereich 9.1 des ersten Speichers 9 verbundene vierte Vergleichereinheit 25 vorgesehen, deren Ausgang mit der Signaleinrichtung 21 verbunden ist.

Weiterhin ist vorgesehen, daß die Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich bei Eintritt in den vorgegebenen Bewegungsbereich wiederhergestellt wird, wenn der vorgegebene Bewegungsbereich durch Aufbringung entsprechender Betätigungskräfte verlassen wurde und anschließend mit einer entsprechend geringen Betätigungskraft erneut angefahren wird. Hierzu ist eine mit der ersten Meßeinrichtung 7 und dem ersten Teilbereich 9.1 des ersten Speichers verbundene fünfte Vergleichereinheit 26 sowie eine UND-Schaltung 27 vorgesehen, deren Ausgang 27.3 mit dem zweiten Schalteingang 15.5 des ersten Umschalters 15 verbunden ist. Die UND-Schaltung 27 weist einen ersten Eingang 27.1 auf, der mit dem Ausgang 26.1 der fünften Vergleichereinheit 26 verbunden ist, sowie einen invertierenden zweiten Eingang 27.2, der mit dem Ausgang 24.1 der dritten Vergleichereinheit 24 verbunden ist. Liegt die Betätigungskraft unterhalb der dritten Schwelle der dritten Schwelleninformation und liegt gleichzeitig die durch die ersten Meßeinrichtung 7 erfaßte Position des Werkzeuges 1 innerhalb des in dem ersten Teilbereich 9.1 vorgegebenen Bewegungsbereiches, so liegt am Ausgang 27.3 der UND-Schaltung 27 und damit am zweiten Schalteingang 15.5 des ersten Umschalters 15 ein Schaltimpuls an, durch den der erste Umschalter 15 den ersten Teilbereich 9.1 mit der Verarbeitungseinheit 14 verbindet, wodurch die Verarbeitungseinheit 14 auf die in dem ersten Teilbereich 9.1 abgelegten ersten Informationen für die Steuerung der Antriebseinheiten 4 zugreift und somit die Zwangsführung im vorgegebenen Bewegungsbereich wiederhergestellt ist.

Die Erfindung beschränkt sich in ihrer Ausführung nicht auf die vorstehend angegebenen bevorzugten Ausführungsbeispiele. Vielmehr ist eine Anzahl von Varianten möglich, welche von der dargestellten Lösung auch bei grundsätzlich anders gearteten Ausführungen Gebrauch macht.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Führen eines Werkzeuges (1), insbesondere eines Meß- und/oder Bearbeitungswerkzeuges, im Raum, bei dem das Werkzeug (1), das am freien Ende (2.1) eines Gelenkarmes (2) angeordnet ist, dessen Armabschnitte (3) über mit einer Steuereinrichtung (6) verbundene Antriebseinheiten (4) zueinander verschwenkbar und/oder verfahrbar sind, gesteuert durch die Steuereinrichtung (6) über die Antriebseinheiten (4) in wenigstens einem begrenzten Bewegungsbereich verfahren wird, wobei zur Vorgabe des begrenzten Bewegungsbereiches des Werkzeuges (1) für die ersten Punkte, die im Bewegungsbereich liegen, jeweils ein Schwenkwinkel und/oder Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) festgelegt wird und die jeweilige Position und Lage des Werkzeuges (1) durch wenigstens eine erste Meßeinrichtung (7) erfaßt

wird, dadurch gekennzeichnet,

daß zur handgesteuerten Führung des Werkzeuges (1) durch eine zweite Meßeinrichtung (8) eine auf das Werkzeug (1) und/oder den Gelenkarm (2) ausgeübte Betätigungskraft erfaßt wird und

daß die Armabschnitte (3) gesteuert durch die Steuereinrichtung (6) in Abhängigkeit von der erfaßten Betätigungskraft, der erfaßten Position des Werkzeuges (1) und dem vorgegebenen Bewegungsbereich derart zueinander verschwenkt und/oder verfahren werden, daß sich das Werkzeug (1) innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches im wesentlichen in Richtung der Betätigungskraft bewegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ist-Position des Werkzeuges (1) und die Richtung der Betätigungskraft kontinuierlich oder intermittierend ermittelt werden, für die ermittelte Ist-Position aus den benachbarten ersten Punkten derjenige ermittelt wird, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft aufweist, und die Armabschnitte (3) durch die Antriebseinheiten (4) in die diesem ersten Punkt entsprechende Winkelstellung verschwenkt und/oder die entsprechende Verfahrsstellung verfahren werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Bewegungsbereich wenigstens eine Raumkurve und/oder wenigstens eine Freiformfläche und/oder wenigstens einen Raumbereich umfaßt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Größe der ermittelten Betätigungskraft eine erste Schwelle vorgegeben wird, bei deren Überschreitung das Verschwenken der Armabschnitte (3) erfolgt, und/oder eine zweite Schwelle vorgegeben wird, bei deren Unterschreitung das Verschwenken und/oder Verfahren der Armabschnitte (3) beendet wird und die Armabschnitte (3) in ihrer jeweiligen Schwenkposition und/oder Verfahrsposition festgesetzt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß innerhalb des Bewegungsbereiches ein erster Unterbereich festgelegt wird und daß das Anfahren von ersten Punkten innerhalb des ersten Unterbereiches durch wenigstens ein erstes akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht wird und/oder das Anfahren von ersten Punkten außerhalb des ersten Unterbereiches durch wenigstens ein zweites akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für das Werkzeug (1) für die zweiten Punkte, die in dem durch das auf dem Gelenkarm (2) befindliche Werkzeug (1) erreichbaren Raum liegen, jeweils ein Schwenkwinkel und/oder eine Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) festgelegt wird und für die Größe der ermittelten Betätigungskraft eine dritte Schwelle vorgegeben wird, bei deren Überschreitung das Verschwenken und/oder Verfahren der Armabschnitte (3) derart erfolgt, daß sich das Werkzeug im wesentlichen in Richtung des zur erfaßten Ist-Position benachbarten zweiten Punktes bewegt, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft aufweist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Anfahren von zweiten Punkten innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches durch wenigstens ein drittes akustisches und/oder optisches Signal

kenntlich gemacht wird und/oder das Anfahren von zweiten Punkten außerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches durch wenigstens ein viertes akustisches und/oder optisches Signal kenntlich gemacht wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) der Schwenkwinkel und die Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) erfaßt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassung des Schwenkwinkels und der Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) durch wenigstens einen im Anschlußbereich zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) angeordneten Lagegeber erfolgt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) nach Art einer Koppelnavigation über die Bestimmung der Position eines ersten Anschlusses zwischen zwei Armabschnitten (3) im Raum durch wenigstens drei raumfeste voneinander beabstandete Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) und wenigstens einen im Bereich des ersten Anschlusses zwischen zwei Armabschnitten (3) des Gelenkarmes (2) angeordneten Empfänger (12) sowie die Erfassung der Schwenkwinkel und der Verfahrsposition der Armabschnitte (3) zwischen dem ersten Anschluß und dem Werkzeug (1) erfolgt.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) im Raum über wenigstens drei raumfeste, voneinander beabstandete Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) und wenigstens einen am Werkzeug angeordneten Empfänger (12) erfolgt.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß fünf Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5), die mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen senden, und ein zur Erfassung der Phasenlage der Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) ausgebildeter Empfänger (12) verwendet werden.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß als Hochfrequenzsender Laserdioden (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) mit Modulationsfrequenzen zwischen 1 MHz und 10 GHz verwendet werden.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassung der Betätigungskraft durch im Bereich der Anschlüsse zwischen den Armabschnitten (3) angeordnete Kraft- und/oder Drehmomentsensoren erfolgt.

15. Vorrichtung zum Führen eines Werkzeuges (1), insbesondere eines Meß- und/oder Bearbeitungswerkzeuges, im Raum, die einen Gelenkarm (2) mit über Antriebseinheiten (4) zueinander verschwenk- und/oder verfahrbaren Armabschnitten (3), eine mit den Antriebseinheiten (4) verbundene Steuereinrichtung (6), einen mit der Steuereinrichtung (6) verbundenen ersten Speicher (9) und eine mit der Steuereinrichtung (6) verbundene erste Meßeinrichtung (7) zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) umfaßt, wobei das Werkzeug (1) mit dem freien Ende (2.1) des Gelenkarmes (2) verbindbar ist und der erste Speicher (9) zur Vorgabe eines Bewegungsbereiches für das Werkzeug (1) für die Punkte, die im vorgegebenen Bewegungsbereich liegen, jeweils eine erste Information

über den Schwenkwinkel und/oder Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) enthält, dadurch gekennzeichnet;

daß zur handgesteuerten Führung des Werkzeuges (1) eine mit der Steuereinrichtung (6) verbundene zweite Meßeinrichtung (8) zur Erfassung einer auf das Werkzeug (1) und/oder den Gelenkarm (2) ausgeübten Betätigungskraft vorgesehen ist und

daß die Steuereinrichtung (6) derart ausgebildet ist, daß das Werkzeug (1) über die Antriebseinheiten (4) in Abhängigkeit von den erfaßten Betätigungskraft und der erfaßten Position des Werkzeuges (1) innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereichs im wesentlichen in Richtung der Betätigungskraft verfahren wird.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (6) derart ausgebildet ist, daß für die ermittelte Ist-Position des Werkzeuges (1) aus den benachbarten Punkten im vorgegebenen Bewegungsbereich derjenige ermittelt wird, dessen von der Ist-Position ausgehender Ortsvektor die geringste Abweichung von der Richtung der Betätigungskraft aufweist, und die Armabschnitte (3) durch die Antriebseinheiten (4) in die diesem Punkt entsprechende Winkelstellung verschwenkt und/oder die entsprechende Verfahrsstellung verfahren werden.

17. Vorrichtung nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Bewegungsbereich wenigstens eine Raumkurve und/oder wenigstens eine Freiformfläche und/oder wenigstens einen Raumbereich umfaßt.

18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (6) eine Verarbeitungseinheit (14), eine mit dem Steuereingang (14.1) der Verarbeitungseinheit (14) und der zweiten Meßeinrichtung (8) verbundene erste Vergleichereinheit (17), einen damit verbundenen zweiten Speicher (18) und/oder einen mit der Vergleichereinheit (17) verbundenen dritten Speicher (19) umfaßt, wobei

der zweite Speicher (18) zur Auslösung der durch die Verarbeitungseinheit (14) gesteuerten Betätigung der Antriebseinheiten (4) durch die erste Vergleichereinheit (17) bei Überschreiten einer ersten Schwelle der Betätigungskraft eine erste Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft enthält, und der dritte Speicher (19) zur Beendigung der durch die Verarbeitungseinheit (14) gesteuerten Betätigung der Antriebseinheiten (4) durch die erste Vergleichereinheit (17) bei Unterschreiten einer zweiten Schwelle der Betätigungskraft eine zweite Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft enthält.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß mit der Verarbeitungseinheit (14) verbundene Einrichtungen (20) zum durch die Verarbeitungseinheit (14) gesteuerten gegenseitigen Festsetzen der Armabschnitte (3) bei Unterschreiten der zweiten Schwelle der Betätigungskraft vorgesehen sind.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (6) eine mit der ersten Meßeinrichtung (7) verbundene zweite Vergleichereinheit (22) umfaßt und der erste Speicher (9) einen ersten Teilbereich (9.1), in dem die ersten Informationen gespeichert sind, und einen mit der zweiten Vergleichereinheit (22) verbundenen zweiten Teilbereich (9.2) umfaßt, der eine zweite Information enthält, durch die innerhalb des Bewegungsbereiches ein erster Unterbereich festgelegt ist, und daß eine erste akustische und/oder optische Signaleinrichtung

(21) vorgesehen ist, die zur Abgabe wenigstens eines ersten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von ersten Punkten innerhalb des ersten Unterbereiches und/oder zur Abgabe wenigstens eines zweiten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von ersten Punkten außerhalb des ersten Unterbereiches mit der zweiten Vergleichereinheit (22) verbunden ist.

21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Speicher (9) einen ersten Teilbereich (9.1), in dem die ersten Informationen gespeichert sind, und einen dritten Teilbereich (9.3) umfaßt, der für die Punkte, die in dem durch das am Gelenkarm (2) befindliche Werkzeug (1) erreichbaren Raum liegen, jeweils eine dritte Information über den Schwenkwinkel und/oder Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) enthält, und daß die Steuereinrichtung (6) eine Verarbeitungseinheit (14), einen ersten Umschalter (15), eine mit dem ersten Schalteingang (15.4) des ersten Umschalters (15) und der zweiten Meßeinrichtung (8) verbundene dritte Vergleichereinheit (24) und einen mit der dritten Vergleichereinheit (24) verbundenen vierten Speicher (23) umfaßt, wobei

der erste Teilbereich (9.1) mit dem ersten Eingang (15.1) des ersten Umschalters (15), der dritte Teilbereich (9.3) mit dem zweiten Eingang (15.2) des ersten Umschalters (15) sowie der Ausgang (15.3) des ersten Umschalters (15) mit der Verarbeitungseinheit (14) verbunden ist,

der vierte Speicher (23) eine dritte Schwelleninformation für die Größe der Betätigungskraft enthält und die dritte Vergleichereinheit (24) und der erste Umschalter (15) derart ausgebildet sind, daß bei Überschreiten der Schwelle der dritten Schwelleninformation der Betätigungskraft der dritte Teilbereich (9.3) gesteuert durch die dritte Vergleichereinheit (24) über den ersten Umschalter (15) mit der Verarbeitungseinheit (14) verbunden ist.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (6) eine mit der ersten Meßeinrichtung (7) und dem ersten Speicher (9) verbundene vierte Vergleichereinheit (25) umfaßt und eine zweite akustische und/oder optische Signaleinrichtung (21) vorgesehen ist, die zur Abgabe wenigstens eines dritten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von Punkten innerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches und/oder zur Abgabe wenigstens eines vierten akustischen und/oder optischen Signals bei Anfahren von Punkten außerhalb des vorgegebenen Bewegungsbereiches mit der vierten Vergleichereinheit (25) verbunden ist.

23. Vorrichtung nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (6) eine mit der ersten Meßeinrichtung und dem ersten Teilbereich (9.1) des ersten Speichers (9) verbundene fünfte Vergleichereinheit (26) und eine UND-Schaltung (27) umfaßt, deren Ausgang (27.3) mit dem zweiten Schalteingang (15.5) des ersten Umschalters (15) verbunden ist, wobei

die UND-Schaltung (27) einen ersten Eingang (27.1), der mit dem Ausgang (26.1) der fünften Vergleichereinheit (26) verbunden ist, und einen invertierenden zweiten Eingang (27.2) aufweist, der mit dem Ausgang (24.1) der dritten Vergleichereinheit (24) verbunden ist, und

die dritte Vergleichereinheit (24), die fünfte Vergleichereinheit (26) und der erste Umschalter (15) derart

ausgebildet sind, daß bei einer Betätigungskraft unterhalb der Schwelle der dritten Schwelleninformation und einer Werkzeugposition innerhalb des Bewegungsbereiches der erste Teilbereich (9.1) über den ersten Umschalter (15) mit der Verarbeitungseinheit (14) verbunden ist.

24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Meßeinrichtung (7) zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) erste Meßeinheiten zur Erfassung der Schwenkwinkel und der Verfahrsposition zwischen den jeweiligen Armabschnitten (3) umfaßt.

25. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die ersten Meßeinheiten von im Anschlußbereich der Armabschnitte (3) angeordneten Lagegebern, insbesondere im Bereich des jeweiligen Gelenkes angeordneten Winkelgebern, gebildet sind.

26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Meßeinrichtung (7) zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) nach Art einer Koppelnavigation wenigstens drei raumfeste voneinander beabstandete Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) und wenigstens einen in einem ersten Anschlußbereich zweier Armabschnitte (3) angeordneten Empfänger (12) zur Bestimmung der Position des ersten Anschlusses im Raum umfaßt sowie erste Meßeinheiten zur Erfassung der Schwenkwinkel und der Verfahrsposition der Armabschnitte (3) zwischen dem ersten Anschluß und dem Werkzeug (1) umfaßt.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Meßeinrichtung (7) zur Erfassung der Position und Lage des Werkzeuges (1) im Raum wenigstens drei raumfeste, voneinander beabstandete Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) und wenigstens einen im Bereich des Werkzeuges (1) angeordneten Empfänger (12) umfaßt.

28. Vorrichtung nach Anspruch 26 oder 27, dadurch gekennzeichnet, daß fünf Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5), die mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen senden, und ein zur Erfassung der Phasenlage der Hochfrequenzsender (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) ausgebildeter Empfänger (12) vorgesehen sind.

29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß die Hochfrequenzsender von Laserdioden (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5) mit Modulationsfrequenzen zwischen 1 MHz und 10 GHz gebildet sind.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Meßeinrichtung (8) zur Erfassung der Betätigungskraft im Anschlußbereich der Armabschnitte (3) angeordnete Kraft- und/oder Drehmomentsensoren umfaßt.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

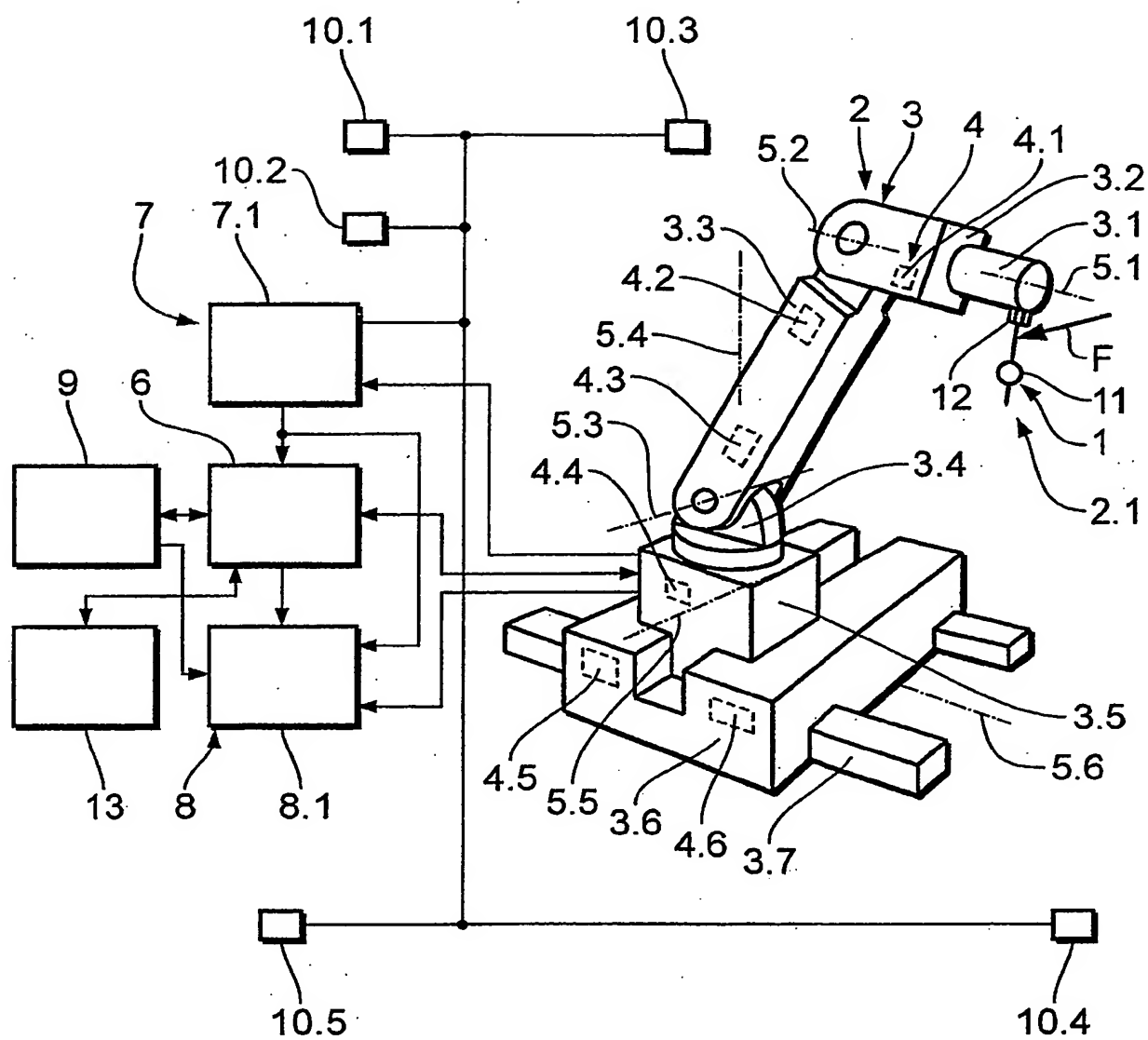


Fig.1

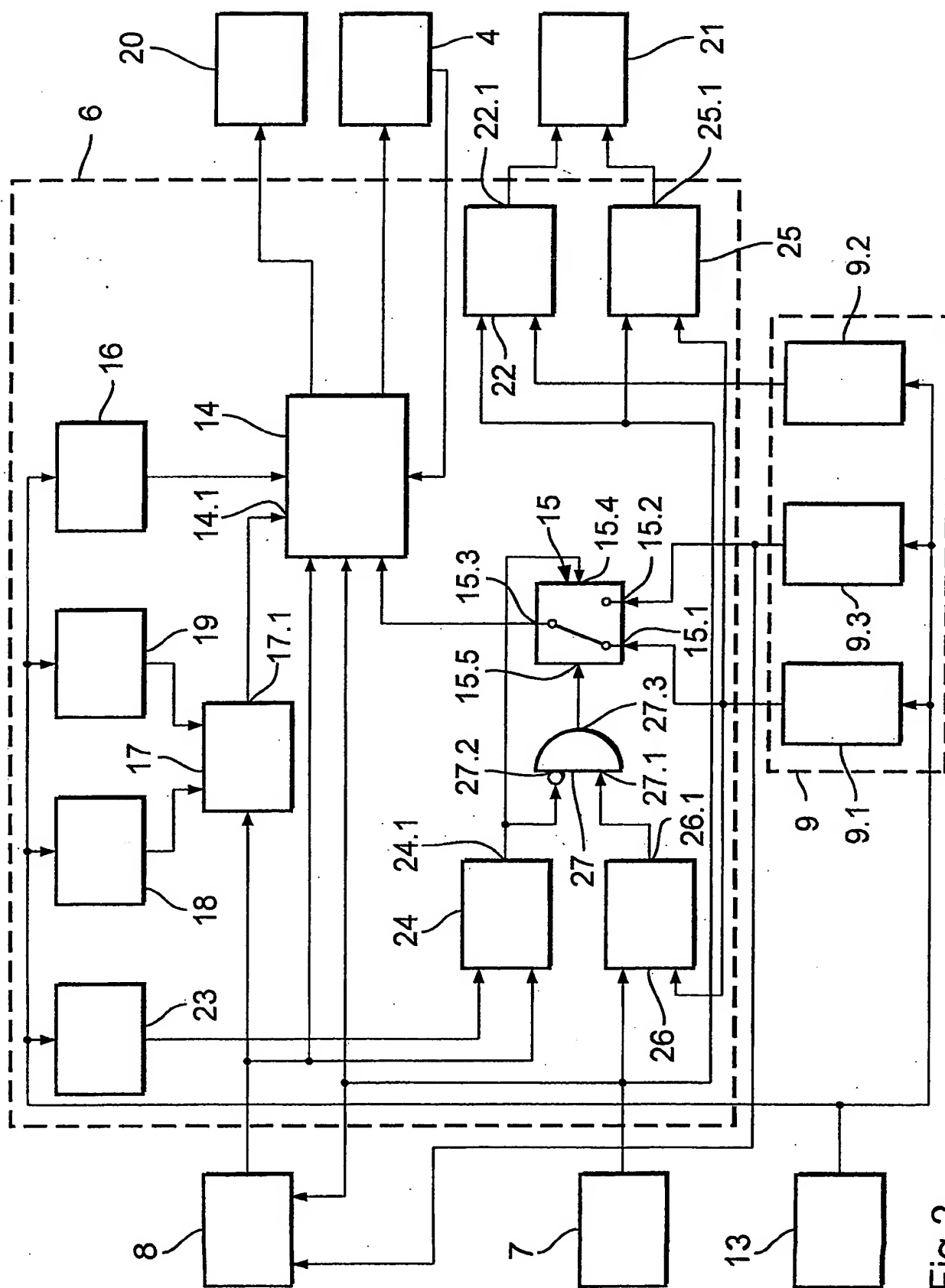


Fig. 2